

Н.А.ТКАЧУК, канд.техн.наук; **Г.Д.ГРИЦЕНКО**, канд.техн.наук;
Э.В.ГЛУЩЕНКО, канд.техн.наук; **А.В.ТКАЧУК**, НТУ «ХПИ»

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Запропоновано програмно-апаратний комплекс для аналізу і синтезу моделей елементів складних механічних систем. Комплекс реалізує розрахунково-експериментальний метод досліджень. В основі – узагальнений параметричний підхід та спеціалізовані системи досліджень.

The hardware-software complex for the analysis and synthesis of models of the complicated mechanical systems elements is offered. The complex realizes a numerical-experimental method of researches. In a basis is the generalized parametrical approach and the specialized researching systems.

1. Состояние вопроса. Основные требования к инструментальным средствам численных исследований элементов сложных механических систем.

Для современного состояния численных методов, программного и аппаратного обеспечения для исследования, анализа и синтеза элементов сложных механических систем с учетом напряженно-деформированного состояния характерны: высокая степень развития математических моделей для исследования различных физико-механических процессов; наличие формального аппарата численного решения возникающих задач (методы, алгоритмы); большое разнообразие программных пакетов, потенциально обладающие “практически неограниченными” возможностями для решения возникающих в реальных условиях задач. В то же время попытки построить “универсальные” инструментальные средства для решения задач, диктуемых потребностями современного машиностроения, упираются в ряд ограничений.

Прежде всего это ограничения *ресурсные*. Действительно, попытки решения задач выше средней сложности (например, со множеством зон контакта, связанные задачи, нестационарные динамические процессы, физически или геометрически нелинейные процессы деформирования, ударное взаимодействие) в интегрированных CAD/CAM/CAE-продуктах или даже в специализированных CAE-системах требуют зачастую таких объемов ресурсов, которые в распоряжении исследователей отсутствуют. Это касается и времени решения, и объема оперативной памяти (зачастую не позволяют вообще “запустить” задачу), и объема дисковой памяти. Применение специализированных пакетов в данном случае не спасает в силу наличия у них целого ряда функциональных ограничений. В качестве одного из выходов можно опереться на специализированные системы автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем [1-3]. При этом все равно требуемый объем ресурсов, уменьшаясь на порядок, остается существенным ограничительным фактором.

Вторым очень существенным ограничением является отсутствие *досто-*

верных и сбалансированных численных моделей исследуемых объектов. Это касается условий нагружения, граничных условий, условий сопряжения, типов конечных элементов и характеристик конечно-элементной сетки. Данные вопросы нельзя решить только внутренними средствами конечно-элементных пакетов. Необходимо опираться на возможности, которыми обладают экспериментальные методы. В работах [4-8] предложен качественно новый способ исследований, соединяющий в едином процессе расчетные и экспериментальные этапы. В качестве результата исследований выступают достоверные численные модели, которые дают возможность с уверенностью использовать их для последующих численных расчетов.

Решив упомянутые принципиальные методологические проблемы, исследователь сталкивается с практической задачей создания инструмента, реализующего предложенные подходы. Ниже описан процесс создания *специализированного программно-аппаратного комплекса* для расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем. К нему были предъявлены следующие требования:

- Модульный принцип построения;
- Наличие единой базы данных;
- Открытость архитектуры;
- Модифицируемость и расширяемость;
- Максимальная автоматизация процессов исследований;
- “Настраиваемость на масштаб” возникающей задачи.

2. Структура и схема функционирования программно-аппаратного комплекса

Предложенная технология исследований реализована в виде специализированного программно-аппаратного комплекса (рис. 1). Используя единый формат данных, носители информации и единую технологию работы с информацией, на основе обобщенного параметрического подхода строится работа с моделями и массивами данных, представленная на рис. 2. Рассмотрим функционирование отдельных звеньев созданного специализированного программно-аппаратного комплекса (СПАК) применительно к исследованию элементов технологической оснастки (ЭТО) для оснащения современных технологических систем.

Для обеспечения параллельного проведения исследований на всех этапах работ (параллельно с разработкой моделей, чертежей, оснастки и т.д.) необходимы или использование единой информационной базы для всех этапов работ, или разработка специальных процедур согласования структур данных на различных этапах. Это может быть осуществлено как в ручном режиме, так и путем создания специализированных систем автоматизированного проектирования, исследования и изготовления. Специализированные системы ориентированы на те или иные классы объектов. Для обмена информацией между этими системами и универсальными системами могут быть разработаны специальные форматы и программное обеспечение. В то же время некоторые

системы (например, Pro/ENGINEER), обеспечивают единый формат хранения и обработки данных. Основой их функционирования является параметрический подход к пространственным, расчетным моделям и конструкторским документам. Естественным образом предлагается использовать параметрический подход, в частности, к построению и исследованию моделей даже без обеспечения сквозной цепочки ассоциативных связей в течение выполнения проекта создания той или иной сложной механической системы (рис. 3). В параметрической модели определяющими параметрами могут быть как конструктивные размеры, так и силовые воздействия, технологические параметры, физико-механические свойства материалов и т.д., а также варианты конструктивных решений. Важно то, что при параметризации моделей исследуемых элементов соблюдается целостность конструкции при варьировании отдельных их параметров или наборов таких параметров. Параметризация также является основным шагом на пути применения того или иного метода оптимизации конструкции. В данном случае предлагается параметрический подход предложить для уточнения параметров достоверных численных моделей исследуемых элементов (типы конечных элементов, их размеры, зоны сгущения и т.д.).

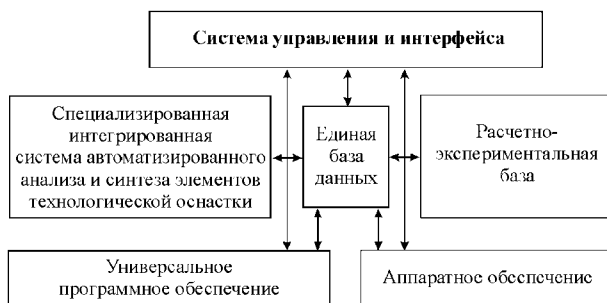


Рисунок 1 – Общая схема анализа и синтеза элементов сложных механических систем (на примере элементов технологической оснастки)



Рисунок 2 – Структурная схема системы автоматизированного расчетно-экспериментального исследования

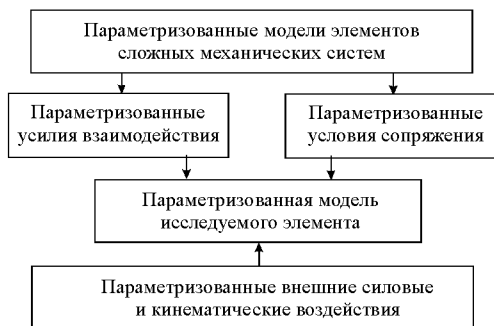


Рис.3. Параметризованные модели элементов сложной механической системы

Существующие в настоящее время направления исследования механических конструкций можно разделить по типу используемого программного обеспечения (специализированное и универсальное), преимущества и недостатки которых обусловлены их структурой, сложностью и областью применения. Для устранения недостатков указанных типов программного обеспечения и объединения их преимуществ предлагается использовать ин-

тегрированные схемы исследований. Данные подходы объединяют универсальные CAD-системы (например, PRO/ENGINEER), универсальные CAE-системы (ANSYS), а также специальное ПО. Результатом работы всего указанного комплекса являются параметризованные конечно-элементные модели, которые позволяют оперативно производить построение баз данных и их модификацию для возникающих задач.

Использование специализированных программных модулей позволяет дополнить современные мощные компьютерные системы проектирования и анализа накопленным опытом, знаниями и учетом специфики проектируемых изделий. При этом объединяются тенденции универсализации, возможностей интеллектуализации моделей и специализации их направленности.

Таким образом, комплексная схема построения конечно-элементной модели элементов сложных механических систем и исследования их напряженно-деформированного состояния принимает многозвенный вид, представленный на рис. 4.

Предложенный подход соединяет преимущества параметрического моделирования, универсальности и учета специфики исследуемых конструкций, специализированного программного обеспечения, а также классического метода конечных элементов. Полученные параметрические модели в соответствие со схемой, приведенной на рис. 2, используются для поливариантных расчетов напряженно-деформированного состояния ЭТО с целью определения параметров достоверных численных моделей.

Предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований на основе применения параметрических пространственных твердотельных и конечно-элементных моделей.

Взаимодействие отдельных модулей СПАК показано на рис.5. Как указыва-

лось ранее, самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально проверенные результаты численных исследований, но и рационально сбалансированная достоверная численная модель объекта. Конечно-элементная модель сложного объекта может иметь также и большую коммерческую ценность. Кроме того, предложенная методика может быть положена в основу иерархической базы данных и знаний о том или ином классе объектов, причем объектами сравнения могут быть множества баз данных (как численных, так и экспериментальных). Здесь также могут быть введены соответствующие критерии улучшения модели, причем для сравнения могут быть взяты модели, полученные независимо из различных источников и в разное время.

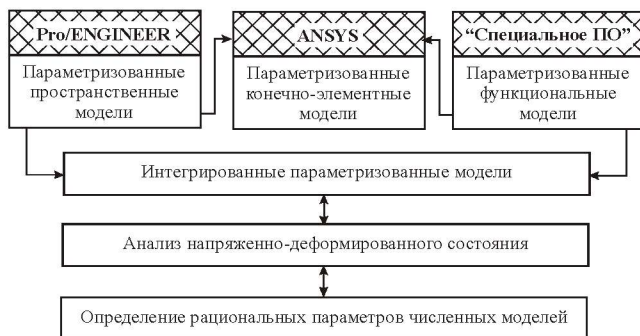


Рисунок 4 – Комплексная схема построения параметрических моделей для исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем

Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения напряженно-деформированного состояния тех или иных объектов или классов объектов.

При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода ее можно обратить: пусть имеется достаточно точный инструмент исследования численных моделей, однако существует сомнение в применимости тех или иных математических моделей. То же – на любом участке цепи “математическая модель – численная модель – экспериментальная модель с измерительной аппаратурой”. В этом случае можно определить структуру и параметры той или иной модели или определить область в пространстве варьируемых параметров, в пределах которой справедливы созданные модели.

Формально в процессе исследований можно “уравнять в правах” все типы моделей, выделив группу уточняющих моделей и уточняемую модель. Кроме того, возможна и постановка “смешанной” задачи, т.е. задачи, в которой объектом уточнения является множество параметров, представляющее совокупность параметров из различных типов моделей. В этом случае вместо уточняющих и уточняемых моделей (и их параметров) в качестве основных объектов выступают соответственно подмножества параметров. Более того, состав этих множеств может изменяться за счет “миграции” параметров из группы в группу.



Рисунок 5 – Взаимодействие модулей созданного СПАК на базе метода конечных элементов и спекл-голографической интерферометрии

Предлагаемый метод изучения напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем допускает глубокую степень формализации, однако большую роль в процессе исследований играет сам исследователь (или группа исследователей). В его компетенции – определение, изменение (удаление, пополнение) множества параметров, а также границ их изменения, разрешение коллизий, а также текущий контроль за процессом. Это обусловлено, во-первых, невозможностью на данном этапе полной формализации предлагаемой технологии исследований, во-вторых, необходимостью исключения тупиковых ситуаций и, в-третьих, очень высокой стоимостью ошибки (неоправданное усложнение плана экспериментальных исследований может повлечь такой рост общей стоимости всего комплекса исследований группы или класса конструкций, что он превысит стоимость аналогичных работ по традиционному способу).

Предложенные схемы расчетно-экспериментальных исследований позволяют оперативно проводить *серии* исследований групп конструкций, при-

чем наиболее трудоемкая часть, а именно экспериментальная, проводится в минимально возможном объеме.

Используя преимущества INTERNET-технологий, исследования с применением предложенного расчетно-экспериментального метода можно, во-первых, распараллелить (т.е. одновременно выполнять отдельные этапы и подэтапы силами различных исследователей и исследовательских групп), а, во-вторых, разнести географически и хронологически. При организации сервера баз данных возможна также определенная организация хранения результатов исследований, позволяющая создавать банки данных по тем или иным группам конструкций. Придав таким базам данных свойства открытости и доступности, на определенной стадии их развития можно создавать “верификационные эталоны” для различных видов механических систем. Это в свою очередь позволяет создавать экспертные системы, само существование которых избавило бы от необходимости проводить большую часть экспериментальных исследований, поскольку перед предстоящим циклом исследований всегда была бы возможность обратиться к соответствующей (и все время пополняемой) базе знаний. Чем полнее и совершеннее эта база, тем больше вероятность получить необходимые рекомендации для построения достоверной численной модели исследуемой механической системы.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели.

Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований.

3. Состав программного и аппаратного комплексов

При оснащении создаваемого программно-аппаратного комплекса программным обеспечением учитывались следующие факторы: максимальные функциональные возможности программного обеспечения; беспроблемность обмена данными; соответствие потребностей программного обеспечения возможностям аппаратного обеспечения; возможность использования лицензионного программного обеспечения в научных исследованиях и учебном процессе.

В связи с этим в состав ПО были включены следующие программные комплексы (рис. 6).

Для реализации всех возможностей разработанного и привлекаемого программного обеспечения при формировании аппаратного обеспечения созданного программно-аппаратного комплекса предъявлялись следующие требования: максимальное использование возможностей, представляемых ПО и

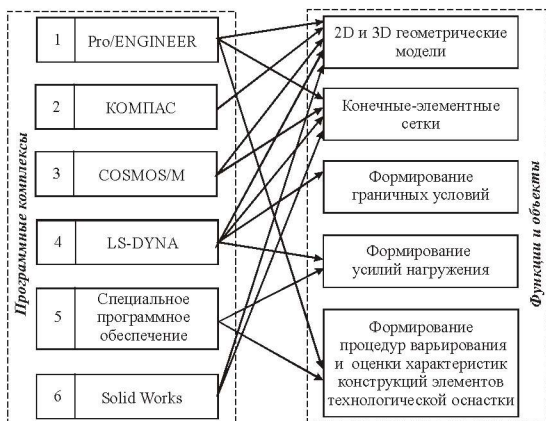


Рис. 6. Программные комплексы, их функции и объекты оперирования в создаваемом программно-аппаратном комплексе



Рисунок 7 – Состав и функции элементов аппаратного обеспечения программно-аппаратного комплекса

Созданный программно-аппаратный комплекс обеспечивает расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем практически любой степени сложности в короткие сроки. Так, объем оперативной памяти в 4 GB (вычислитель на базе процессоров XEON) позволяет размещать в оперативной памяти задачи, по объему соответствующие граничным возможностям операционной системы Windows и системы ANSYS для 32-разрядных платформ. При этом RAID-массивы накопителей на жестких магнитных дисках объемом 0,3 TB позволяют размещать сверхгромоздкие базы данных и оперативно их обрабатывать. Голографическая установка СИН-1 (см. рис. 7) дает возможность фиксации спекл-интерферограмм проектируемых элементов технологической оснастки, причем точность определения перемещений – до 0,1 мкм.

Для ввода графической информации в компьютер используется комплекс на основе Web-камеры, цифровых фотокамер HP и Olympus с фиксирующими матрицами 1 и 4 мегапикселей. Передача и хранение информации осуществляется при помощи перезаписываемых и записываемых оптических носителей информации емкостью 0,7-4,7 GB, а также накопителей на жестких магнитных дисках емкостью 1,1 TB.

Разделение задачи численных исследований на препроцессинг, решение систем уравнений и постпроцессинг позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы программно-аппаратного комплекса, привлекая на первый и третий этапы этого процесса компьютеры с более скромными требованиями к их техническим характеристикам и сосредотачивая всю вычислительную мощь, требуемую на втором этапе, на кластерной системе и двух-процессорных рабочих станциях.

Особенностью созданного программно-аппаратного комплекса является блочно-модульная структура аппаратного обеспечения и программного обеспечения, способность к развитию и модернизации, универсальность.

4. Решение модельных задач

С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса было проведено решение ряда тестовых задач. В частности, для апробации функционирования экспериментальной части ПАК было спроектировано, изготовлено и смонтировано устройство под условным названием “Краб” (рис. 8). Данное устройство позволяет проводить крепление и нагружение сплошных и перфорированных пластин, геометрия которых может быть достаточно произвольной. В частности, были спроектированы, изготовлены и исследованы сплошные и перфорированные пластины для имитации поведения базовых плит приспособлений и других объектов с особенностями геометрии. На рис. 9 приведены некоторые голографические интерферограммы, характеризующие деформированное состояние пластин при действии центрально приложенной внешней силы (имитировалось при помощи силового винта приспособления “Краб”).

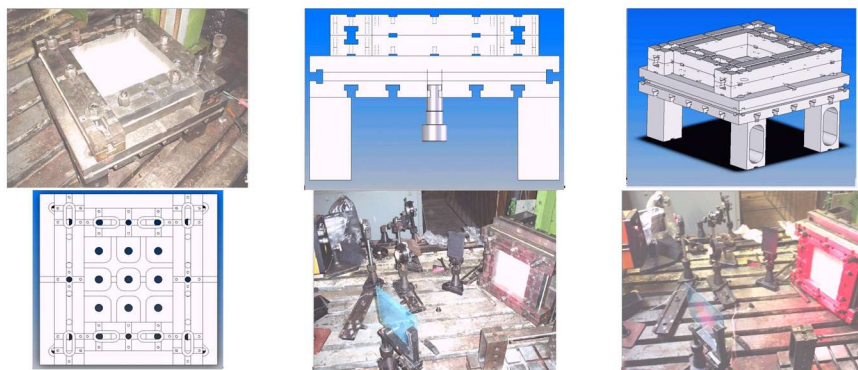


Рисунок 8 – Экспериментальное устройство “Краб”

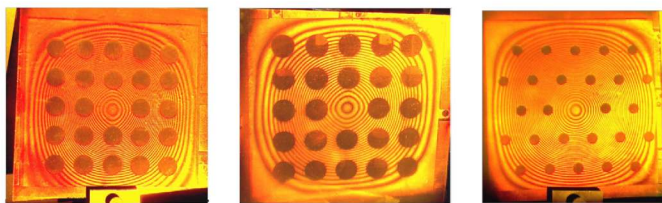


Рисунок 9 – Голографические интерферогаммы тест-пластин

Параллельно с экспериментом проводился численный анализ напряженно-деформированного состояния данных пластин (рис. 10). Конечно-элементные модели тест-пластин приведены на рис. 11.

На рис. 12, 13 приведены результаты количественного сравнения данных, полученных численно и экспериментально. Видно, что при уменьшении среднего размера конечного элемента конечно-элементные модели повышается точность результатов. Однако это приводит к значительному росту требуемых для расчетов вычислительных ресурсов. Таким образом, исходя из конкретных условий и требований, возникающих на практике, можно путем варьирования конечно-элементной модели обеспечивать необходимую точность численных моделей элементов технологической оснастки.

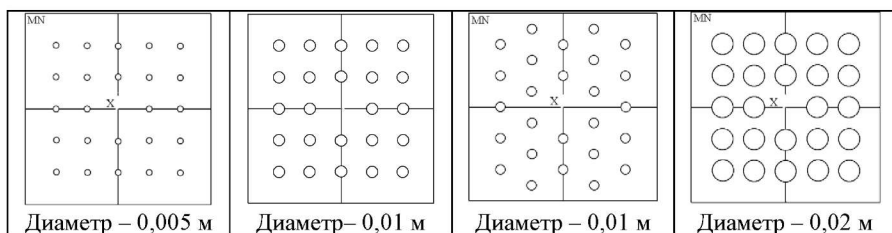


Рисунок 10 – Схема сплошных и перфорированных тест-пластин толщиной 2 и 4 мм, материал – Сталь 20Х, размеры по контуру закрепления – 0,18х0,18 м и варьируемым диаметром отверстий

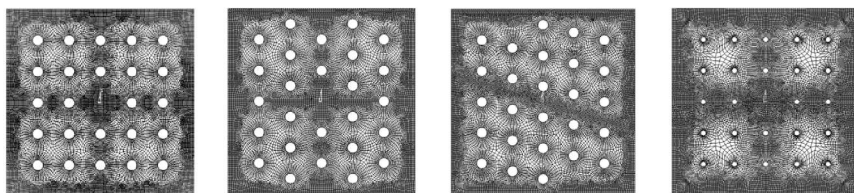


Рисунок 11 – Конечно-элементные модели тест-пластин

5. Заключение

Проведенный комплекс расчетных и экспериментальных исследований подтвердил достоверность и точность работы отдельных модулей программно-аппаратного комплекса и позволяет сделать следующие выводы.

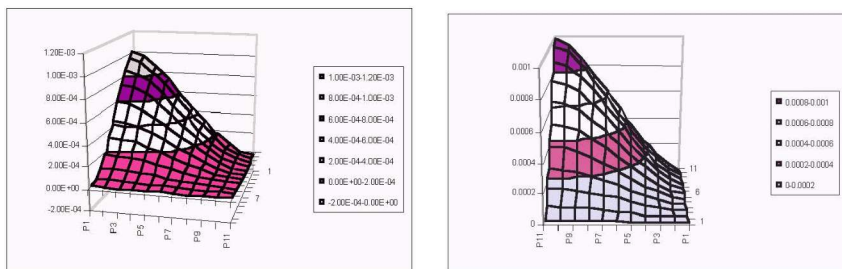


Рисунок 12 – Распределение перемещений в пластине, полученное численно и экспериментально

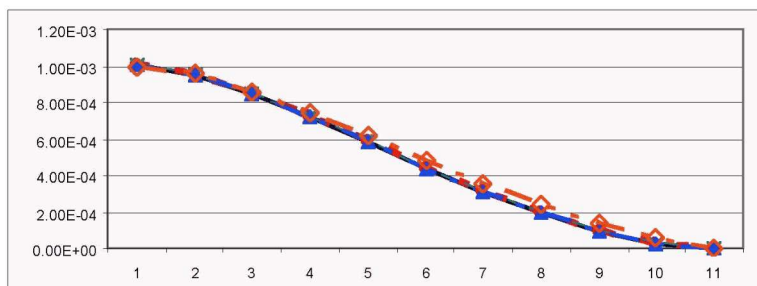


Рисунок 13 – Результаты численного сравнения экспериментальных и численных данных анализа напряженно-деформированного состояния тест-пластин (одна четверть)

1. Предложенный подход к решению задачи синтеза численных моделей элементов сложных механических систем реализован в виде *сбалансированного* по составу, производительности, емкости аппаратного и программного обеспечения программно-аппаратного комплекса.

2. Разработанный СПАК дает возможность в автоматизированном режиме производить построение пространственных параметрических моделей и конечно-элементных сеток элементов исследуемых объектов

3. Исследователь в процессе расчетов и экспериментов имеет возможность корректировки процесса синтеза моделей на всех этапах исследований

4. Тестовые расчеты подтвердили высокую эффективность и точность разработанного ПАК.

5. Разработанный программно-аппаратный комплекс построен на базе соединения возможностей современных эффективных методов, технологий аппаратных средств и программных комплексов, что в совокупности создает качественно новую среду автоматизации расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем, в т.ч. технологической оснастки.

Таким образом, создан реальный мощный инструмент решения любых задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем с обеспечением высокой точности и достоверности результатов. Этот программно-аппаратный комплекс развернут на базе центра «Тензор» НТУ «ХПИ» и является по сути первым в

Украине специализированным программно-аппаратным комплексом с такими возможностями (Tensor.kharkiv.com, mailto:tenzor@online.kharkiv.ua).

Список литературы: 1. Гриценко Г.Д., Малакей А.Н., Миргородский Ю.Я., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем // Механіка та машинобудування. – 2002. – № 1. – С. 6-13. 2. Ткачук Н.А., Пономарев Е.П., Медведева А.В., Миргородский Ю.Я., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д. Определение рациональных параметров элементов механических систем // Механіка та машинобудування. – 2001. – № 1,2. – С. 308-314. 3. Ткачук Н.А. Специализированные системы автоматизированного исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологической оснастки // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – № 12. т.1. – С.166-171. 4. Ткачук Н.А. Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем. // Динамика и прочность машин. – 1998. – Вып. 56. – С. 175-181. 5. Ткачук Н.А. Экспериментальное определение параметров конечно-элементных моделей // Механіка та машинобудування. – 1998. – № 1. – С.68-75. 6. Кавустин А.А., Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 1999. – Вып.53. – С.148-155. 7. Ткачук Н.А. Элементы технологических систем: компьютерные модели, экспериментальные исследования, численный анализ прочности и жесткости // Вісник Інженерної Академії України. – Київ. – 2001. – № 3 (част.2). – С.297-302. 8. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование элементов сложных механических систем // Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – Одесса. – 2001. – Вып.5. – С.198-201.

Поступила в редколлегию 29.04.04

УДК 622.691.4

А.В.ЯКУНИН, канд.техн.наук; *В.А.ФАТАУШКИН*, НТУ «ХПИ»;

НЕСТАЦИОНАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

Розглядаються слабо нестационарні неізотермічні керовані процеси транспорту газу, що дозволяє використати ряд спрощуючих припущень про характер течії. Пропонується інтегрально-різницева модель розподілу тиску газу вздовж трубопроводу, одержана на основі методу малого параметра і декомпозиції крайової задачі в рамках операційного числення. Рекурентні процедури послідовного інтегрування можна реалізувати як стандартними методами, так і на основі попередньої апроксимації ядер інтегральних операторів та їх аргументів.

Введение. Развитие современных систем оперативно-технологического управления магистральными газопроводами (МГ) требует постоянного совершенствования соответствующего математического обеспечения [1-4]. Предлагаемая модель представляет собой модификацию с учетом дополнительных факторов известных интегрально-разностных уравнений нестационарных изотермических потоков в МГ [5, 6]. Трансформация основана на декомпозиции краевой задачи по малому параметру [7] в рамках операционного исчисления [8].